METALOGRAFÍA

Es la ciencia que estudia la composición estructural de los metales y aleaciones para relacionarla con las propiedades mecánicas de los mismos. El examen estructural de los metales y aleaciones por vía microscópica se utiliza tanto como para la investigación científica como para el control de calidad de los materiales.

MICROSCOPIA

La importancia de la observación micrográfica está dada por la influencia que ejercen los componentes químicos de una aleación. Estos componentes reciben el nombre de constituyentes metalográficos.

PREPARACIÓN DE PROBETAS PARA LA OBSERVACIÓN MICROSCOPICA

1. Selección y extracción de la muestra
2. Montaje
3. Desbaste
4. Pulido
5. Ataque

1. SELECCIÓN Y EXTRACCIÓN DE LA MUESTRA

Hay que tener en cuenta los siguientes aspectos:

a. Elección del lugar de donde se extraerá la muestra: depende de la práctica y lo que se quiera examinar. Por ejemplo: si se desea conocer la estructura de una barra que ha sido tratada térmicamente y determinar la homogeneidad de dicho tratamiento, lo ideal sería conocer las estructuras obtenidas en los bordes y en el centro de la pieza (figura 1). En cambio, en caso de analizar una muestra de material moldado que fue bruto de colada, es conveniente descartar la parte superior donde se genera el rechupe y seleccionar una sección perpendicular de la superficie de colada (figura 2). Y cuando se desea analizar piezas forjadas o laminadas, es conveniente tomar muestras de una sección longitudinal y otra transversal.

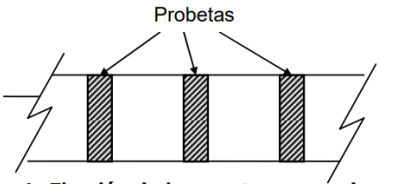
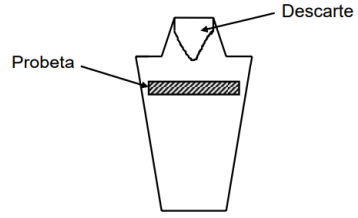


Fig. 1: Elección de la muestra en una barra



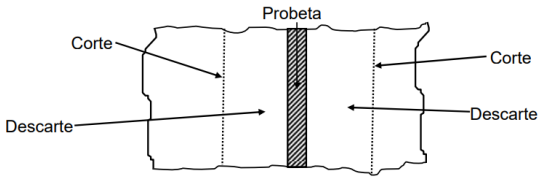


Fig. 3. Elección de una muestra por corte oxiacetilénico

b. Forma de practicar la extracción y precauciones: si el metal de la muestra es blando, el corte puede hacerse mediante una sierra mecánica o manual. Para materiales duros se pueden utilizar cortadoras metalográficas.
c. Condiciones y estado del material: es importante saber si se trata de un metal bruto de colada, forjado, laminado y recocido, entre otros.

2. MONTAJE: se realiza cuando las muestras son pequeñas y difíciles de manipular en las operaciones de desbaste y pulido. Se monta la pieza en un material adecuado llamado "inclusión", generalmente se utilizan plásticos sintéticos, como puede ser la bakelita o el acrílico, ya que estos materiales son resistentes a los ácidos que pudieran utilizarse en el pulido o el ataque.
   En el caso que se quiera observar capas de tratamientos termoquímicos o fisuras, el agregado de bolillas de acero en el momento de la inclusión ayudará a que los bordes no se deformen.
   a. Montaje en caliente: la muestra se coloca en una prensa hidráulica, llamada incluidora, donde se añade la bakelita, utilizada mediante un proceso bajo presión y calor.
      Las ventajas son:
      - La calidad y la dureza de la embutición son superiores a la embutición en frio.
      - Se dispone de diferentes diámetros.
      - Es un método rápido.
      - Se mantienen las tolerancias exactas del diámetro de embutición.

      Las desventajas son:
      - Las muestras sensibles al calor no pueden ser embutidas.
      - El método es lento cuando se trata de embutir grandes cantidades de muestra.

   b. Montaje en frio: se coloca la muestra en un molde y luego se añade las resinas y el endurecedor a utilizar, las cuales deben mezclarse previamente y luego se vierten sobre la muestra cubriéndola en su totalidad.
      Las ventajas son:
      - Rápidas cuando hay un gran número de muestras para embutir.
      - Pueden hacerse moldes de cualquier forma.

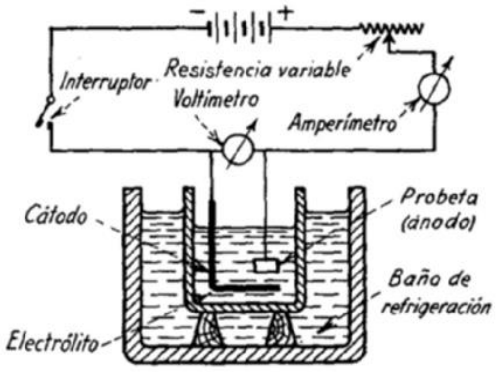
      Las desventajas son:
      - Las resinas son blandas.
      - No se respetan las tolerancias de los diámetros de embutición.

3. DESBASTE: tiene por objeto preparar la superficie a examinar. Se realiza usando papeles o discos esmeriles de carburo de silicio al agua en forma mecánica o manual. Tanto para la desbastadora de banda, discos o en forma manual, se utiliza una misma secuencia de papeles esmeriles al agua, partiendo desde el papel 120 (grueso) y continuando con 220, 320, 400 y finalmente 600 (fino).
   Para realizar el desbaste mecánico se debe desbastar entre 60 a 120 segundos en cada papel, y al cambiar de un papel al otro la probeta debe lavarse con agua con el objetivo de refrigerar y barrer de la superficie las partículas de material tanto de la muestra como del abrasivo.
   Y, además, es necesario girar la probeta 90° de manera tal de asegurar que las rayas producidas por un papel más grueso sean eliminadas.

4. PULIDO: tiene por objetivo eliminar de la superficie las rayas finas producidas en la última operación de desbaste dejando una superficie especular.
   i. Pulido mecánico: se realiza en uno o más discos, los cuales son platos de bronce o PVC de 20 a 25 cm de diámetro cubiertos con un paño, que giran en un plano horizontal a una velocidad que varía desde 150 a 250 rpm.
      - La elección de un paño para pulir depende de la finalidad del examen metalográfico.
      - Los abrasivos al combinarse con un esfuerzo mecánico actúan sobre otros materiales para modificar su acabado a través del desgaste. El abrasivo ideal es la pasta diamantada que se utiliza para la preparación de muestras o aleaciones muy duras. Otro abrasivo es la alúmina, el óxido de magnesio, el óxido de cromo, entre otros.
      - Los lubricantes usados en los casos citados anteriormente son el alcohol etílico o etilenglicol para el caso de utilizarse pasta de diamante.
   ii. Pulido electrolítico: tiene como resultado la disolución anódica selectiva y progresiva del metal. Disminuye notablemente las distorsiones superficiales producidas durante el pulido mecánico. Los tiempos de ejecución son de aproximadamente de 7 a 9 minutos.
   Ventajas:
      - Evita la formación de capas distorsionadas en la superficie de la muestra.
      - Es ideal para metales blandos, aleaciones monofásicas y aleaciones que endurecen fácilmente por deformación.
      - Ahorra tiempo y es más económico.

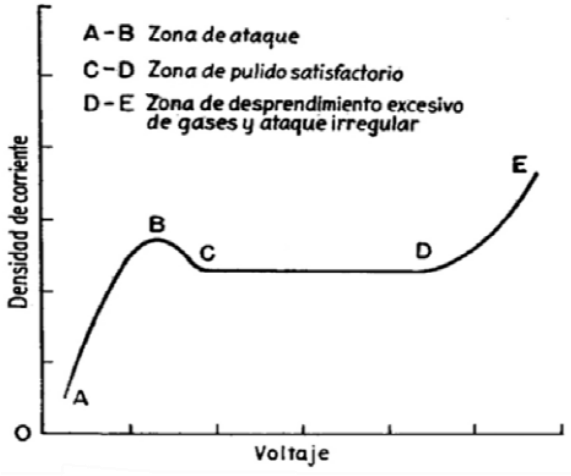
   Desventajas:
      - Destrucción parcial o total de las inclusiones no metálicas por reacciones químicas con los electrolitos usados.
      - La reacción del electrolito sobre los bordes de las microfisuras o fisuras superficiales hace que éstas se agranden y a si vez produzcan un redondeamiento de los bordes que desfiguran y agrandan los defectos originales.

      a. Pulido en celda electrolítica: consiste en sumergir en un electrolito adecuado la probeta que actúa como ánodo, empleando como cátodo un material apropiado. A través del electrolito se hace pasar una corriente continua que es transportada de ánodo a cátodo, lo cual produce la disolución anódica de la superficie de la probeta puliéndola.



   Los factores que influyen en el pulido electrolítico son:

   1) La relación entre densidad de corriente y el voltaje para cada electrolito (es el factor más importante).
   2) La temperatura del electrolito.
   3) La agitación del electrolito.
   4) La preparación previa de la muestra.
   5) El tiempo de pulido.



Curva Densidad de Corriente - Voltaje

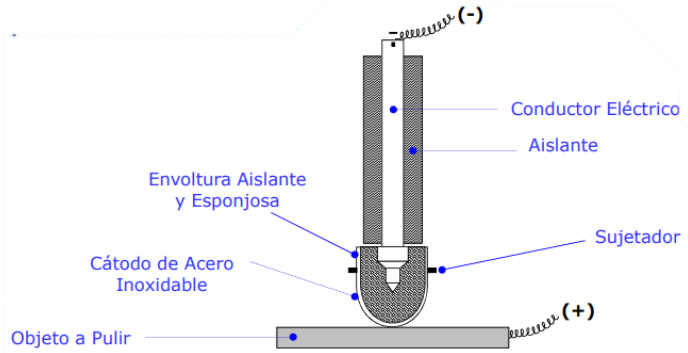
En la región A-B la densidad de corriente aumenta proporcionalmente al voltaje y corresponde a la formación de una película inestable en la superficie de la probeta. Cuando el voltaje aumenta, la película se estabiliza y la capa límite está casi formada, Punto B, produciéndose una caída de la densidad. Al aumentar más el voltaje se alcanza un estado de equilibrio, Punto C. Luego en la región C-D es donde se consigue un pulido satisfactorio. Cuando el voltaje sobrepasa el valor límite correspondiente a la región de pulido, se produce un abundante desprendimiento gaseoso en la superficie de la muestra (generalmente oxígeno) que rompe la continuidad de la capa límite D-E. Este desprendimiento causa un pulido irregular.

La elección de los electrolitos depende de las características del material (composición, estructura, etc.) así como el tiempo de pulido, temperatura, voltaje y densidad de corriente.

b. Pulido por medio de equipos automáticos: estos equipos son óptimos para el control del material. Una vez fijadas las condiciones de pulido, la tarea es muy sencilla y requiere poca especialización. El hecho que las densidades de corriente utilizadas sean elevadas, hace posible la obtención de pulidos satisfactorios en tiempos muy cortos, por lo que es muy recomendable para el caso de aleaciones polifásicas.
    - Poseen un rectificador, por lo que pueden ser utilizados con la corriente de línea, en general alterna.
    - El pulido queda limitado a un área que nunca es mayor de 3 cm2 y solamente puede pulirse una superficie plana.
    - Utiliza altas densidades de corriente.
    - La disolución del material a pulir es muy grande.
    - El control de las condiciones óptimas es casi automático, tanto en lo que se refiere al pulido como al ataque.

c. Pulido local por el método del tampón: el "tampón" consiste en un electrodo metálico, por lo general de acero inoxidable, cubierto de un material aislante, como, por ejemplo, terciopelo.

- Permite realizar pulidos "in situ"
- Mantener el reactivo en frío.
- La instalación es sencilla y económica.
- Tampones de distintos radios de curvatura.
- Se regula la tensión en vacío.



Método de "réplicas" para ensayos no destructivos: es complemento del pulido por el método del tampón, ya que consiste en obtener una copia exacta sin necesidad de destrucción, que puede ser observada por reflexión o transparencia.

Preparación:

1º. Desbaste con papeles de carburo de silicio.
2º. Pulido localizado con el método del tampón.
3º. Ataque con reactivo en la zona preparada.
4º. Deposición de película fina de barniz nitrocelulósico.
5º. Desprendimiento de la película formada.
6º. Pegar la película sobre un portaobjeto de vidrio.
7º. Metalizar en vacío con aluminio.

5. ATAQUE QUÍMICO: consiste en revelar la microestructura de la muestra. El ataque químico está basado en la diferencia de potencial electroquímico de las fases de la microestructura. Se realiza sumergiendo la muestra metálica pulida en una solución ácida o básica débil.
El ataque electrolítico es igual al ataque químico pero la corriente eléctrica se utilizar para reforzar el ataque.
Los dos pasos de pulido y ataque químico, deben elimina la capa superficial de metal distorsionado causado por las operaciones de desbaste.
Para atacar una muestra de acero al carbono o una fundición, se emplea como reactivo Nital 2 o 4%.

MICROSCOPIOS METALURGICOS: su finalidad es hacer posible la observación de detalles de un objeto que son demasiados pequeños para observarlos a simple vista. Se compone de:

- Sistema mecánico: incluye los componentes que son requeridos para el movimiento de la pieza.
- Sistema óptico: constituido por el objetivo y el ocular. El objetivo define la calidad de la imagen amplificada.
- Sistema de iluminación

Aumento: capacidad que tiene el microscopio de poder dar una imagen un determinado número de veces mayor que el objeto.

Aumento total: está dado por la combinación del objetivo y del ocular.

$$A_T = g_1 \times g_2$$

$$donde\ g_1\ es\ el\ aumento\ del\ objetivo\ y\ g_2\ es\ el\ aumento\ del\ ocular.$$

El tamaño de grano se mide por el método de comparación (ASTME-112) $n = 2^{G-1}$

n: es el número de granos / pulg.^{2} a 100 X

G: Número de Tamaño de Grano ASTM

MACROSCOPIA

Los ensayos macroscópicos se emplean en pocos aumentos y se observan grandes áreas de la probeta en lugar de zonas microscópicas. En estos se puede observar la uniformidad de la estructura, la ubicación y tamaño de las segregaciones y los defectos tales como grietas superficiales o los defectos provenientes del lingote.

El macroataque permite revelar distintos tipos de heterogeneidades:

a. Heterogeneidad Cristalina: depende de la forma de solidificación y crecimiento de los cristales de un metal o aleación
b. Heterogeneidad Química: debida a la presencia de impurezas y a la segregación de componentes químicos. Puede ser intencionada (como las piezas cementadas de acero) o accidental como ocurre con las segregaciones de Azufre o fósforo
c. Heterogeneidad Mecánica: debido al trabajo en frío o cualquier otro proceso que introduce tensiones permanentes en el metal, como, por ejemplo, laminación, forjado, etc.

Técnicas de Macroataque

El proceso consta de tres etapas:

a) Obtención de la muestra apropiada. Si es posible se utilizan piezas enteras.

b) Preparación de una superficie a atacar. Simplemente, con el reactivo utilizado se eliminará el óxido y/o la cascarilla que la pueden cubrir y realizando luego un desbaste de la pieza hasta un papel de SiC # 600.

c) Ataque de la sección. El ataque se produce generalmente por inmersión, durante un cierto tiempo y a determinada temperatura. Conviene trabajar con tiempos y temperaturas bajas para que el ataque no sea tan fuerte y se pierdan detalles en la observación. Es preferible tener que volver a atacar y no arruinar la muestra. Los tiempos no superan los 10’ y 15’.

El buen resultado del macroataque depende de cuatro factores:

1)Condición de la superficie
2)Composición química del reactivo elegido
3)Temperatura del reactivo de ataque
4)Tiempo que dura el ataque

Estructuras y defectos más comunes revelados en el macroataque:

- Estructura Columnar: Suele encontrarse en lingotes que van enfriando muy lentamente. Originan zonas de debilidad.
- Rechupes: Dicha cavidad trae inconvenientes cuando no se eliminan en el despunte del lingote. Esto lleva a la disminución de las propiedades mecánicas.
- Grietas internas: Se producen por enfriamiento inadecuado después del trabajo en caliente. Son discontinuidades que originan roturas en el tratamiento térmico o mecanizado posterior.
- Porosidad: Generada por mala alimentación en la colada o desprendimiento de gases.
- Grietas superficiales: Inician la rotura por fatiga. En secciones transversales se observan directamente.
- Líneas de fluencia: Son una consecuencia natural de la operación de forjado y nos indican como ha fluido el metal.

PRINCIPALES ENSAYOS MACROSCOPICOS

Macroscopía del Azufre Segregado

El Azufre es un elemento sumamente perjudicial que se trata de eliminar con el afinado en los hornos Siemens, Eléctricos, etc. El Azufre debe su efecto perjudicial a su gran afinidad con el Fe para formar sulfuro de hierro (FeS). El FeS se coloca en el contorno de la ferrita y perlita y debido al proceso mecánico de forja aparecen las fisuras o grietas que veremos a bajas temperaturas, pero que se han producido a temperaturas elevadas por la forja. Por esta razón se dice que el S da fragilidad en caliente. Si agregamos Mn, el Azufre tiene mayor afinidad por el Mn que por el Fe, formando con éste un sulfuro de Manganeso (MnS).

Método para determinar la distribución de Azufre

El método macroscópico para determinar la distribución de Azufre segregado, se denomina Método de Baumann, el cual consiste en utilizar un reactivo de ácido sulfúrico diluido al 3% y papel fotográfico con emulsión de sales de bromuro de Plata. Se prepara la probeta como vimos anteriormente. Luego es necesario desengrasar bien la superficie. A continuación, se introduce el papel en el ácido sulfúrico, luego se lo escurre y se lo extiende con la superficie activa hacia arriba y a continuación se coloca la cara plana de la probeta, boca abajo sobre el papel. Se la deja en esa posición aproximadamente 90 seg, luego el papel se lava y fija durante 5 min. con un fijador que puede ser hiposulfito de Sodio y a continuación se lo lava con agua corriente, para eliminar los restos

del fijador, durante ½ a 1 hora. Luego se abrillanta y se obtiene así una macroscopía de la distribución de S.

Esta distribución puede ser:

a. Homogénea: Serie de puntos de color amarillo pardo uniformemente distribuidos sobre un fondo amarillento; menos peligroso.
b. Heterogénea: Se observan rayas o concentraciones de manchas sobre el fondo ya descripto.

Los puntos o rayas son sulfuros de Plata.

Determinación de Fibras o Líneas de Fluencia

Este ensayo pone en evidencia detalles de métodos constructivos, sentidos de laminación, grietas de forja, etc. Supongamos por ejemplo que partimos de materia prima en forma de lingotes, que como es común, posea cantidades importantes de segregaciones e impurezas en el núcleo. Con este acero fabricamos barras y posteriormente bulones. Si tomamos un bulón y lo cortamos longitudinalmente, lo desbastamos y atacamos con un reactivo (por ej. Nital 2), veremos que se observan una serie de fibras, que surgen a la vista por diferencia de ataque entre zonas puras e impuras (crestas y valles), Fig. 20

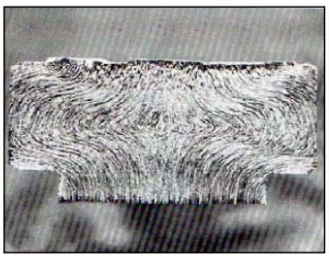


Fig. 20: Líneas de fluencia - cabeza de bulón estampada

Estas fibras son la alineación de las segregaciones originales, que toman la dirección en que se efectuó la deformación del acero.

TRATAMIENTOS TÉRMICOS

En la fractura de un metal podemos distinguir dos clases de estructuras:

a. Estructura cristalina: es una propiedad intrínseca, propia de cada metal. Sólo es posible verla mediante Rayos X. (BCC, FCC)
b. Estructura granular: es visible macrográficamente y puede observarse micrográficamente. Es la que determina las propiedades del metal o aleación, pudiéndose modificar mediante tratamientos térmicos.

El núcleo de crecimiento de cada grano se forma en el estado líquido, donde comienzan a agruparse los átomos en direcciones de crecimiento determinadas. Este proceso se repite en toda la masa líquida. Cuando las direcciones de crecimiento de cada grano se encuentran con las de otros granos, queda formado el límite de grano.

ALEACIÓN: sistema de base metálica y carácter metálico que se presenta macroscópicamente homogéneo y se compone de una mezcla íntima de dos o más metales que puede contener o no elementos metálicos.

Si dos metales en estado líquido están íntimamente unidos, luego de la solidificación puede pasar que:

1. Se formen granos cristalinos en lo que siguen ambas clases de átomos mezclados. (soluciones sólidas y compuestos intermetálicos)
2. Se formen granos cristalinos aislados uno de otro metal. (metales puros y las mezclas eutécticas)
3. Situación intermedia (solubilidad parcial en estado sólido y total en estado líquido)

SOLUCIONES SÓLIDAS: sistema homogéneo de un soluto, sustancia de menor proporción, en un solvente, sustancia de mayor proporción, en estado sólido.

a. Solución sólida por sustitución: la solución sólida conserva la estructura cristalina del solvente en los que átomos del soluto reemplazan a algunos de los propios de la red.
b. Solución sólida por inserción: los átomos del soluto interponen en la red cristalina del solvente, ocupando ciertos espacios posibles.

COMPUESTOS INTERMTÁLICOS: tienen composición fija y se presentan en fases intermedias. Se caracterizan por ser duros y frágiles.

METALES PUROS: se presentan en los casos de solubilidad parcial o insolubilidad total en estado sólido.

MEZCLAS EUTÉCTICAS: es un caso particular de los metales puros.

MEZCLAS EUTECTOIDES: a diferencia de las anteriores parten del estado sólido.

SISTEMA HOMOGÉNEO: cuando todos los elementos observables en volumen tienen iguales propiedades.

SISTEMA HETEROGÉNEO: cuando está constituido por diversas porciones homogéneas que están separadas por superficies de discontinuidad que conducen a diferentes propiedades.

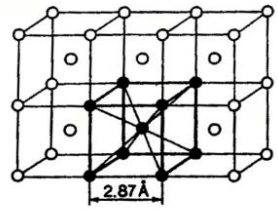
FASES: porciones homogéneas físicamente distintas que componen un sistema heterogéneo.

EQUILIBRIO METAESTABLE: el sistema se encuentra en un estado que no se corresponde con sus parámetros físico-químicos termodinámicos, pero aparenta estar en equilibrio.

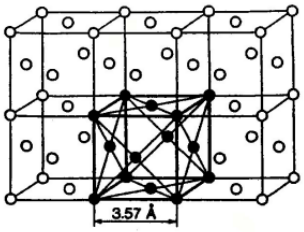
ALEACIONES FERROSAS: el hierro junto con el carbono son los principales constituyentes de los aceros y fundiciones.

En función de la temperatura, decimos que el hierro se presenta en diferentes estados alotrópicos:

- Hierro alfa: cúbica de cuerpo centrado, estable hasta los 910°C. Celda conformada por dos átomos de hierro (1 en el centro + 1/8 en cada vértice compartido x 8 celdas espaciales), magnético hasta los 770°C.
- Hierro gamma: cúbico de caras centradas, estable entre 910°C y 1400°C. Celda conformada por 4 átomos de hierro (1/8 en cada vértice compartido x 8 celdas espaciales + ½ en cada cara x 6 celdas). No magnético.
- Hierro delta: cúbica de cuerpo centrado, estable desde 1400°C hasta la fusión.



Sist. Cúbico Centrado en el Cuerpo
Hierro α



Sist. Cúbico de Caras Centradas
Hierro γ

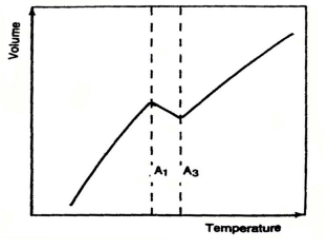


Fig. 1: Contracción de Fe α a Fe γ

El cambio de hierro alfa a hierro gamma se realiza con una contracción, debido a que dos celdas de hierro alfa, 4 átomos, originan 1 celda de hierro gamma, 4 átomos.

- Microconstituyentes
  - a. Fases
    - Ferrita (Solución Sólida)
    - Austenita (Solución Sólida)
    - Cementita (Compuesto Intermetálico)
  - b. Microconstituyentes Polifásicos
    - Perlita (Eutectoide): Ferrita + Cementita
    - Ledeburita (Eutéctico): Austenita + Cementita

FERRITA: solución sólida intersticial de carbono en hierro alfa, cúbico de cuerpo centrado. El contenido máximo de carbono es de 0,025% a 723°C. Es el constituyente más blando de los aceros y es magnético por debajo de los 770°C.

Aparece en los aceros de diversas formas:

- Ferrita proeutectoide, en forma de granos o red acompañando a la perlita en acero hipoeutectoides.
- Como agujas orientadas en los planos de la austenita, en los aceros bruto de colada.
- Como fase componente de la perlita en láminas alternadas con la cementita.
- Como matriz de las estructuras globulares de aceros recocidos.

AUSTENITA: solución sólida intersticial de carbono en hierro gamma, cúbica centrada en las caras. Se encuentra en los aceros por encima de la temperatura critica superior con una solubilidad máxima de 2,11% a 1148°C. Es amagnética, dúctil y tenaz.

CEMENTITA: es un compuesto intermetálico que contiene 6,67% de carbono. Cristaliza formando un paralelepípedo ortorrómbico. Ferromagnético por debajo de los 210°C. Es el constituyente más duro y frágil.

Hay tres tipos según el origen y distinta morfología:

1. Primaria: originada en la solidificación de las fundiciones.
2. Secundaria: originada por la pérdida de solubilidad del carbono en la austenita a medida que desciende la temperatura.
3. Terciaria: variación de solubilidad del carbono en la ferrita.

Micrográficamente la encontramos en:

- Cementita proeutectoide en los aceros hipereutectoides en red, alrededor de la perlita.
- En láminas junto a la ferrita formando perlita.
- Como glóbulos en los aceros recocidos a temperaturas cercanas a los 720°C.
- Como glóbulos en una matriz martensítica.
- Como cementita terciaria en los bordes de grano de la ferrita en los aceros de muy bajo carbono.

PERLITA: microconstituyente polifásico eutectoide de aproximadamente 0,88% de carbono a 723°C, formada por laminas alternadas de ferrita y cementita. La finura de estas laminas y separación depende de la velocidad de enfriamiento que influye en las propiedades mecánicas. Se la puede clasificar en perlita gruesa y perlita fina.

LEDEBURITA: microconstituyente eutéctico formado por una mezcla fina de austenita y cementita a partir de 1147°C con 4,3% de carbono. Por encima de los 721°C se la denomina ledeburita primaria, y por debajo de estos, se la denomina ledeburita secundaria.

DIAGRAMA DE EQUILIBRIO *Fe -Fe_3C*

Las aleaciones de Fe-C se clasifican en dos grandes grupos según el contenido de carbono:

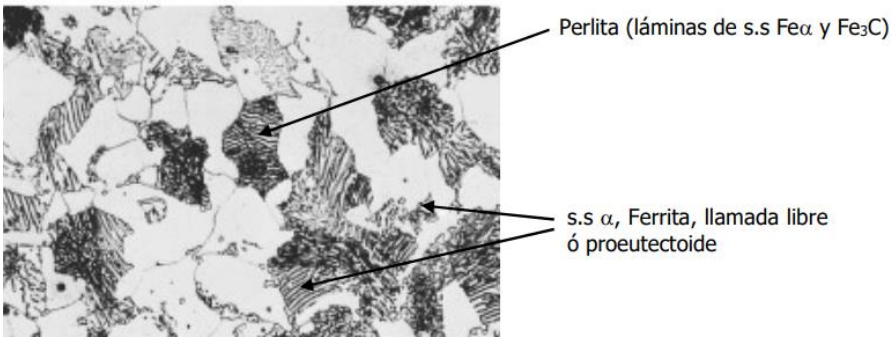
- Aceros (*C<2,1%*)
  - Hipoeutectoides (*C<0,88%*)
  - Eutectoides ($C \cong 0{,}88\%$)
  - Hipereutectoides (*C>0,88% a 2,11%)*

Dos puntos característicos:

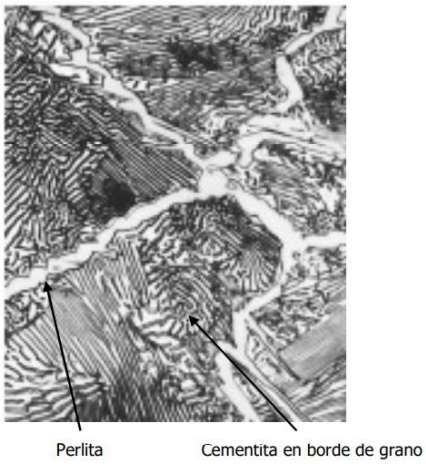
- Eutéctico ($C \cong 4{,}3\%\ formación\ del\ microconstituyente\ ledeburita$)
- Eutectoide ($C \cong 0{,}88\%\ formación\ del\ microconstituyente\ perlita$)

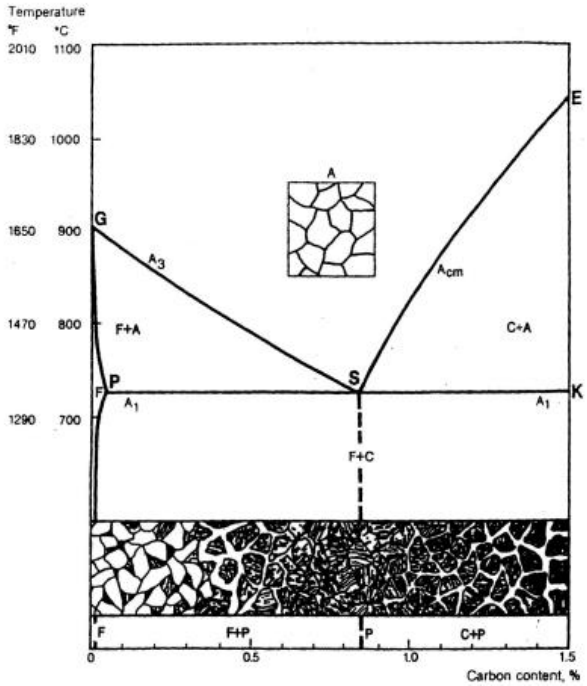
En la transformación eutectoide la temperatura no desciende ni aumenta, es una trasformación isotérmica.

ACERO HIPOEUTECTOIDE



ACERO HIPEREUTECTOIDE



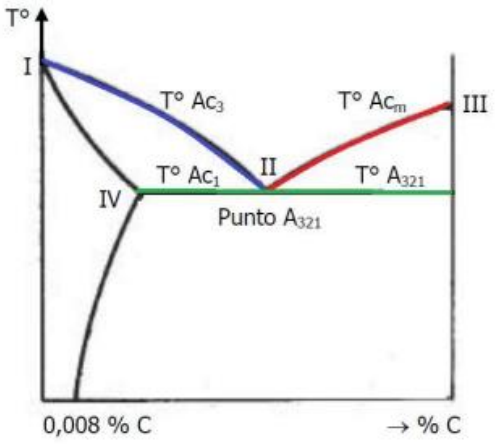


Desde la izquierda, partimos de ferrita 100% para 0,008% de carbono, mezcla de ferrita y perlita creciente hasta 100% de perlita en el punto eutectoide. Hacia la derecha, con contenidos crecientes de carbono, aparece contorneando la cementita, el grano de perlita y vemos crecer su anchura hasta un máximo de 2,11% de carbono, y en el centro del grano en perlita.

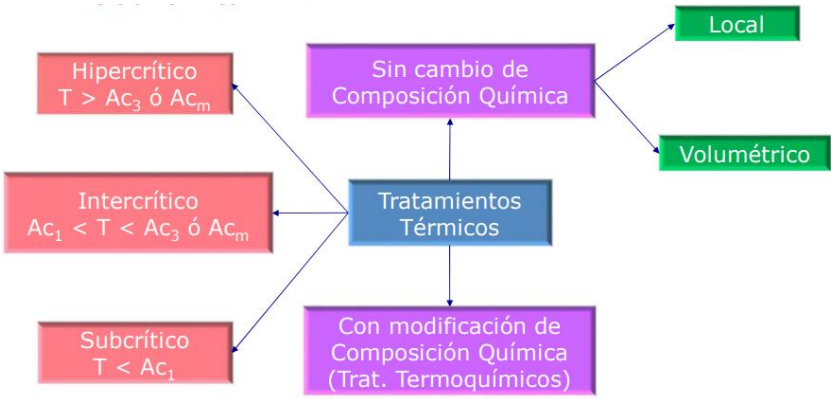
TRANSFROMACIÓN DE LA PERLITA: cuando un acero eutectoide desde el estado austenítico a temperatura por encima de la crítica superior, se lo sumerge en un baño a temperatura por debajo de esta y se lo deja evolucionar a temperatura constante, vemos que a partir de un determinado tiempo se comienza a trasformar la austenita en perlita hasta que se transforma totalmente. Este proceso se realiza por nucleación, aparecen múltiples núcleos de cementita en los límites de grano austenítico. En los flancos de ese núcleo de cementita, la austenita ya casi sin carbono puede transformarse alotrópicamente en ferrita.

PUNTOS CRÍTICOS Y TEMPERATURAS CRÍTICAS:

PUNTO CRITICO	TRANSFORMACION			ACEROS EN QUE SE PRODUCE
A1	Austenita	Ac1 ← / Ar1 →	Ferrita+Cementita (Perlita)	Todos
A3	Austenita	Ac3 ← / Ar3 →	Ferrita	Hipoeutectoides C%< 0,8
Acm	Austenita	Accm ← / Arcm →	Cementita	Hipereutectoides C% > 0,8



Los Tratamientos Térmicos son procesos mediante los cuales se modifican las estructuras y propiedades de los metales o aleaciones, mediante sometimientos a regímenes térmicos.



Los factores determinantes de su efecto son:

a. Tiempo de calentamiento.
b. Temperatura de tratamiento.
c. Tiempo de mantenimiento a esa temperatura.
d. Velocidad de enfriamiento desde esa temperatura.

Los tratamientos térmicos los podemos agrupar en:

1. TRATAMIENTOS TÉRMICOS DE ABLANDAMIENTO: se aplica a piezas fundidas, forjadas, laminadas o trabajadas en frío. Sus propósitos son:
   - Eliminación de tensiones internas producidas durante algún tratamiento previo.
   - Ablandamiento para el logro de determinadas condiciones mecánicas.
   - Ablandamiento para su mejor mecanización.
   - Disminución del tamaño de grano en materiales deformados en frío.
   - Obtención de una determinada microestructura.

a. RECOCIDO

Los podemos dividir en:

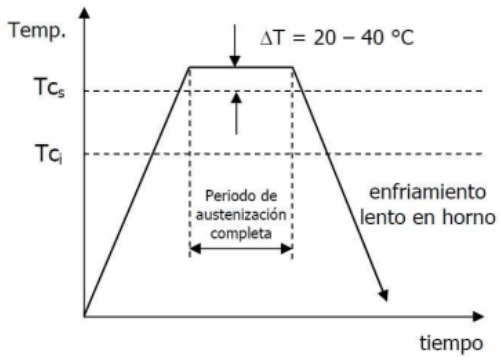
i. Recocido de regeneración

- Recocido de austenización completa: se realiza en la fase austenítica para los aceros hipoeutectoides y eutectoides, calentándolos por encima de la temperatura crítica superior en unos 20 a 40°C.
- Recocidos de austenización incompleta: se realiza para hacer hipereutectoides a una temperatura que está comprendida entre la temperatura crítica superior y la inferior.

  El calentamiento debe ser conducido respetando las siguientes condiciones: ser unifrome, llegar al nucleo de la pieza y no sobrepasar cierta velocidad de calentamiento para establecer menor diferencia de temperatura entre el exterior e interior de la pieza, que eviten grandes tensiones.

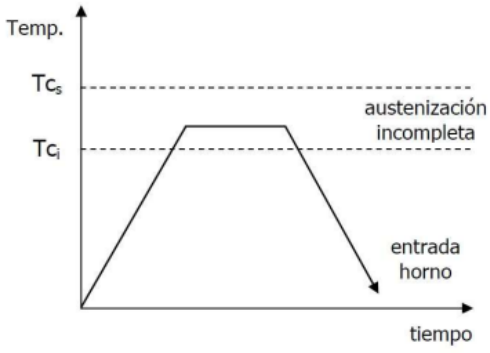
  El enfriamiento es lento en horno, obteniéndose una estructura con perlita gruesa.

Recocido de Austenización completa



Aceros Hipoeutectoides

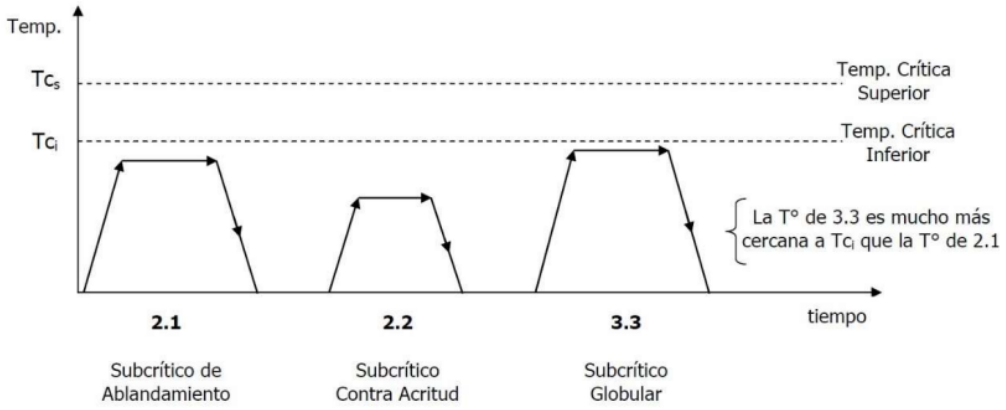
Recocido de Austenización incompleta



Aceros Hipereutectoides

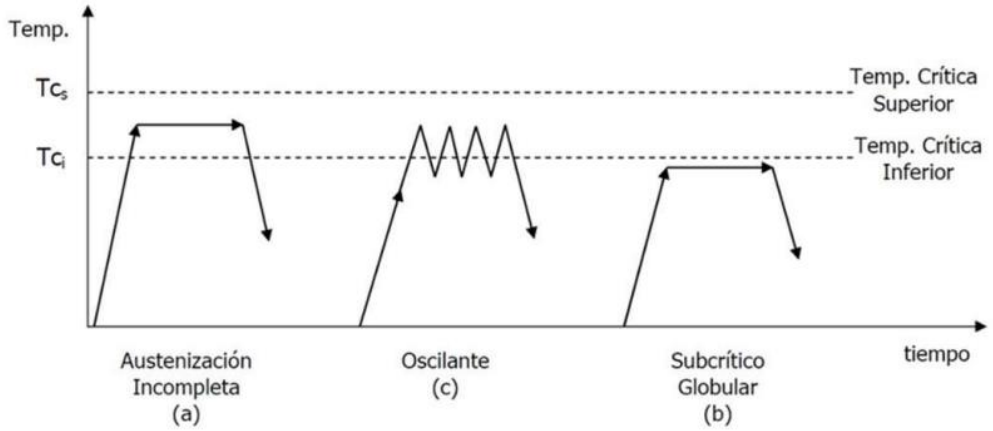
ii. Recocido subcrítico: se realiza por debajo de la temperatura critica inferior y se utiliza para ablandar materiales que han sido endurecidos por el trabajo en frío.

- De ablandamiento: produce la recristalización y la desaparición de tensiones y acritud. Esta recristalización afecta a la ferrita y en los aceros de > 0,4% de carbono, aparece como granos uniformes en contraste con la perlita deformada. Se lo realiza a temperaturas cercanas a Ac1 y es un proceso rápido y económico.
- Contra acritud: el objetivo es disminuir la acritud. Las temperaturas usuales oscilan entre 550°C y 650°C, es útil para aceros con menos de 0,4% de carbono. El enfriamiento es al aire.



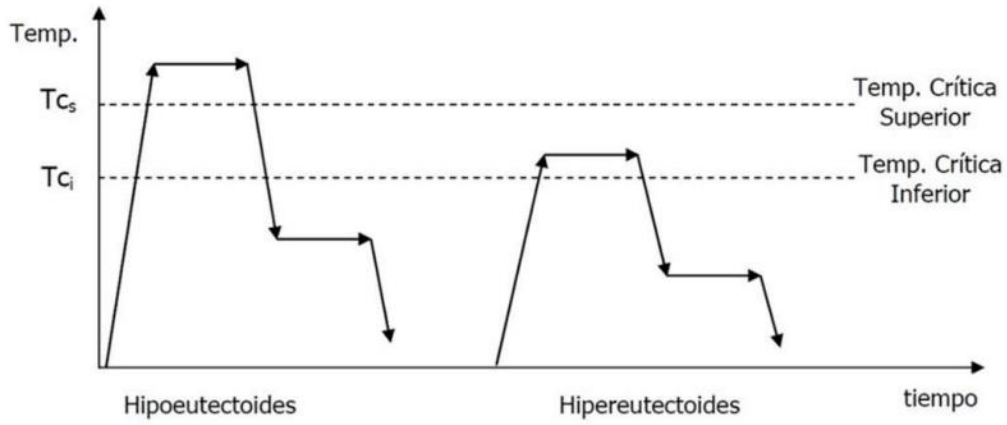
iii. Recocido globular: se suele aplicar a los aceros al carbono y aceros de baja aleación con más de 0,5% de carbono, con el objeto de producir un ablandamiento que mejore la maquinabilidad. El enfriamiento es lento.

Consiste en calentar a temperaturas crítica inferior por encima o debajo de esta o haciendo oscilar por encima y por debajo de ella.



Ciclos para estructuras de Cementita globular

iv. Recocido isotérmico: desde las temperaturas de austenización total o parcial, el acero se sumerge en un baño de sales fundidas a una temperatura por debajo de la crítica inferior y se lo deja que transforme a temperatura constante donde la temperatura de dicho baño oscila entre los 600 a 700°C. Tiene la ventaja de una transformación uniforme de toda la masa y el enfriamiento final es al aire. Para aceros hipoeutectoides la austenización es total, y para aceros hipereutectoides la austenización es parcial.



Tratamientos isotérmicos para aceros hipoeutectoides e hipereutectoides

b. REVENIDO: debe efectuarse posteriormente a todo tratamiento de temple. Consiste en un calentamiento a temperaturas que jamás deben superar la crítica inferior para cada acero, seguido de un mantenimiento a dicha temperatura con posterior enfriamiento. Su principal función es eliminar las tensiones que surgen durante el temple y aumentar la tenacidad. Si el enfriamiento es más lento, menor es la tensión residual. El tiempo de revenido es generalmente de 1 a 2,5hs.
El enfriamiento al aire y en aceite genera menos tensión que un enfriamiento al agua.

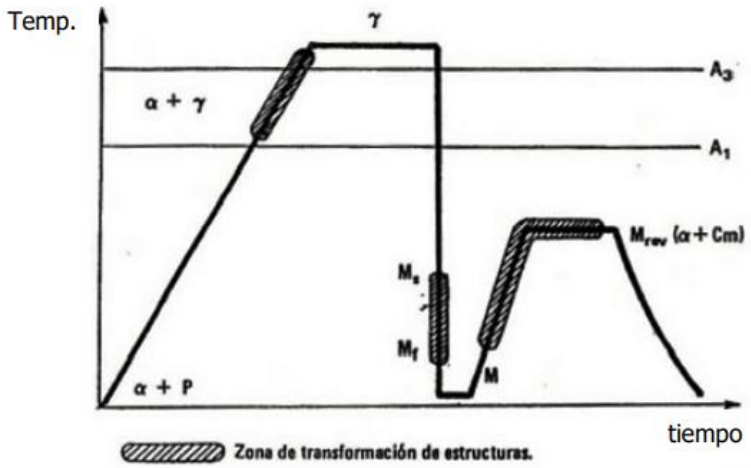


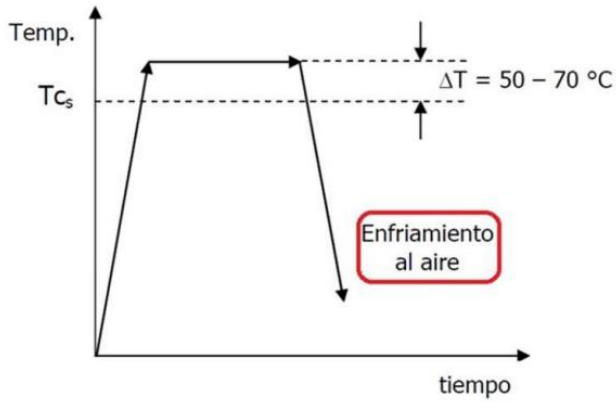
Fig. 14: Ciclo térmico de Temple y Revenido

ETAPAS DEL REVENIDO:

1) Se inicia a una temperatura por debajo de los 150°C, con la formación de carburo épsilon, en los cristales de la martensita. Como el carbono que forma el carburo épsilon proviene de la solución sólida alfa, nos encontramos con dos tipos de martensita, una con bajo contenido de carbono y otra con alto contenido de carbono.
2) Consiste en la separación del carburo de la martensita, lo cual ocurre entre 150 a 350°C. En esta etapa se obtiene martensita revenida, una solución sólida sobresaturada de carbono en hierro alfa, con inclusiones en ella de cristales dispersos de carburo épsilon con forma laminar. En esta segunda etapa existe una caída de la tenacidad.
   Entre alrededor de 230 y 350°C se produce la transformación de la austenita retenida en bainita inferior.
3) Se produce en el intervalo de temperaturas de 350 a 675°C, que, si trabajamos entre 350 a 540°C, las piezas alcanzan una excelente tenacidad y mantienen un aceptable nivel de resistencia (aceros de construcción). Y si trabajamos entre 540 a 675°C tendremos la máxima tenacidad, pero con una disminución de la resistencia.

   FRAGILIDAD DEL REVENIDO: se presenta en los aceros aleados cuando se revienen a temperaturas entre 540 y 675°C. Su característica es la disminución de resiliencia, que ocurre cuando la pieza revenida se enfría a velocidad relativamente lenta, por ejemplo, al aire. Sin embargo, se mantiene la tenacidad cuando se enfría. A este tipo de fragilidad se la llama "FRAGILIDAD KRUPP". Se considera que el Manganeso y Fósforo promueven la sensibilidad del revenido. El molibdeno es el elemento principal en disminuir la sensibilidad a la fragilidad del revenido.

c. NORMALIZADO: consiste en austenizar totalmente el acero, calentándolo a temperaturas superiores en 50-70°C de la crítica superior y luego enfriarlo al aire. Se intenta obtener una estructura de ferrita-perlita, normal de acero y perlita laminar fina. Este tratamiento tiene por finalidad afinar el grano de los aceros brutos de colada, laminados o forjados, y también como paso previo a un temple para obtener una estructura acorde.



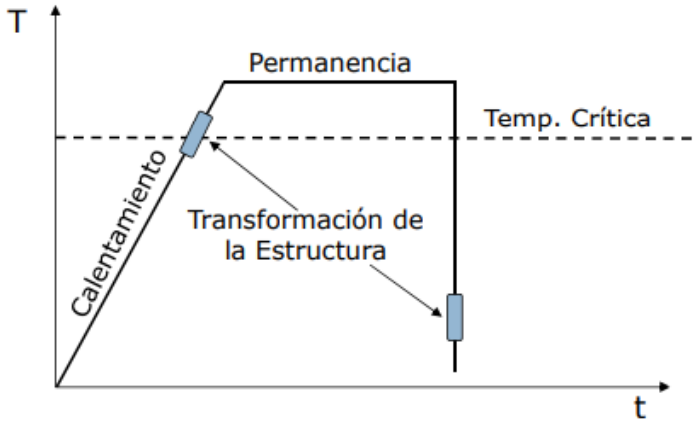
Ciclo térmico de normalizado

Si comparamos los resultados de un normalizado con un recocido de austenización completa, obtenemos una mayor proporción de perlita, menor tamaño de la ferrita proeutectoide, menor separación de las láminas de cementita y menor cantidad de ferrita en el interior de la perlita. En conclusión, el límite elástico, la resistencia a la rotura, dureza y la tenacidad del acero normalizado, resultarán mayores que un acero recocido.

2. <u>TRATAMIENTOS TÉRMICOS DE ENDURECIMIENTO:</u>

Cuando la velocidad de enfriamiento es muy pequeña, aparece la perlita gruesa, luego perlita laminar fina y cuando la velocidad es mayor, aparece un nuevo microconstituyente llamado bainita superior. Al continuar aumentando la velocidad de enfriamiento, aparece otro microconstituyente denominado bainita inferior.

a. TEMPLE: consiste en austenizar al acero parcial o totalmente para luego enfriarlo a una temperatura lo suficientemente alta como para obtener una fracción significativa de martensita, de no menos del 50%. El objetivo de los tratameitnos combinados de temple y revenido, es aumentar lo más posible la resistencia y la dureza, afectando lo mínimo su ductilidad.



- Temple de un acero hipoeutectoide: se lleva a una temperatura entre 40 y 70°C por encima de Ac3, se mantiene el tiempo necesario para lograr la austenización completa y luego se enfría a una velocidad mayor o igual a la velocidad crítica de temple.
- Temple de un acero hipereutectoide: se lleva a una temperatura entre 40 y 70°C por encima de la Ac1, buscando un estado de austenización incompleta. Finalmente se enfría a una velocidad igual o superior a la crítica.

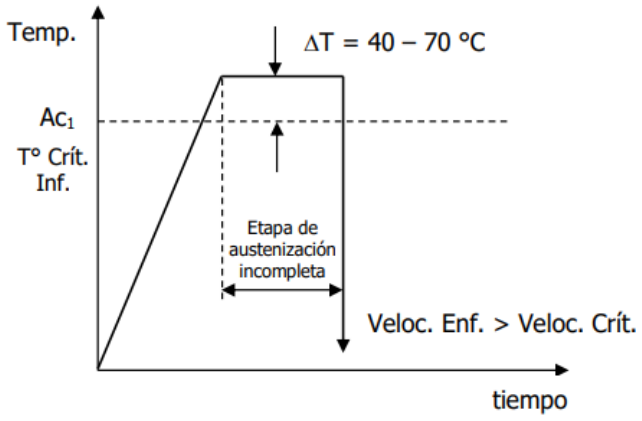


Fig. 13: Temple de Aceros Hipereutectoides

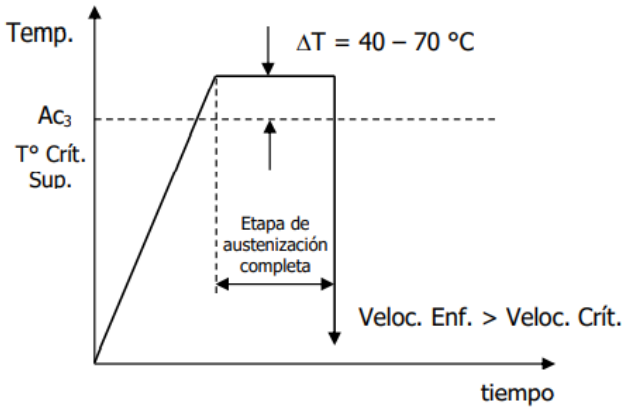


Fig. 12: Temple de Aceros Hipoeutectoides

Factores que rigen el fenómeno de temple:

- Composición química del acero.
- Tamaño de grano.
- Masa o volumen de la pieza.
- Medio de enfriamiento.
- Temperatura y agitación del medio.

VELOCIDAD CRÍTICA DE TEMPLE: es la mínima velocidad de enfriamiento que permite obtener una estructura 100% martensítica, estructura conocida como temple perfecto, el cual es un temple ideal ya que en general siempre queda algo de austenita sin transformar conocida como austenita retenida. Depende de la composición química del acero y el tamaño de grano.

SEVERIDAD DE TEMPLE: es la capacidad del medio de enfriamiento para absorber la mayor cantidad de calor en el menos tiempo posible. Depende de la composición del medio de temple, la temperatura y del grado de agitación del medio de temple

El agua como medio para templar posee una gran velocidad de enfriamiento, pero tiene una serie de defectos:

- Se vaporiza rápidamente la zona que esta inmediatamente en contacto con la pieza a templar, generando una zona en suspensión de aire y vapor que actúa como aislante e interrumpe la posibilidad de continuar un enfriamiento a las velocidades adecuadas que requiere el temple.
- Crea una velocidad de enfriamiento muy alta en la zona de temperatura de la formación de la martensita, lo cual causa el surgimiento de grandes tensiones estructurales, la deformación de la pieza y la aparición de grietas.

TIPOS DE TEMPLE

- Temple total: toda la masa es calentada hasta una determinada temperatura y luego un posterior enfriamiento en un cierto medio (sales, aceite, gas o aire)
    - Temple total ininterrumpido: cuando el medio de enfriamiento se encuentra a una temperatura alrededor de los 60-80°C por debajo de la temperatura de comienzo de la transformación martensítica.
    - Temple interrumpido: cuando se enfría en un baño de sales fundidas, a una temperatura por encima de la temperatura de transformación martensítica, se lo deja un determinado tiempo para equilibrar las temperaturas de la superficie e interior de la pieza y posteriormente se continua el enfriamiento hasta la temperatura ambiente en otro medio de enfriamiento.
      El objetivo de este proceso es minimizar las deformaciones o posibles fisuras por las tensiones producidas en la transformación martensítica entre la superficie y el centro.

- Temple superficial: se produce un calentamiento localizado en la superficie de la pieza, llegando a la temperatura de austenización mediante la aplicación de una llama oxigas o por medio eléctrico. El posterior enfriamiento produce la transformación martensítica quedando el interior sin transformar.

ESTRUCTURAS DE TEMPLE:

BAINITA: no es una fase sino una mezcla de ferrita y carburo de hierro. De apariencia acircular, con placas formadas por un volumen de ferrita en las cuales están incrustadas las partículas de carburo de hierro. La bainita superior se forma a 460°C, y la bainita inferior se forma a 250°C. La transformación bainítica, de austenita a bainita, es isotérmica.

AUSTENITA: solución sólida intersticial de carbono en hierro gamma, cúbica centrada en las caras. Se encuentra en los aceros por encima de la temperatura critica superior con una solubilidad máxima de 2,11% a 1148°C. Es amagnética, dúctil y tenaz. La aparición de la austenita luego del temple, constituye un "defecto del temple", ya que se la conoce como "austenita retenida" que no se transformó a martensita ni en otra estructura intermedia de temple.

MARTENSITA: es una solución sólida sobresaturada de carbono en hiero alfa, que puede o no contener carburos. Es el constituyente típico de los aceros templados. Es magnética.

Características de la transformación martensítica:

- Se produce sin que haya difusión (no hay reordenamiento de la red).
- Se produce a baja temperatura (para que no haya difusión).
- Es continua (tiene temperatura de comienzo a fin).
- Requiere una velocidad mínima de enfriamiento (necesaria para obtener 100% martensita).

TEMPLABILIDAD: capacidad de una aleación ferrosa para transformar a martensita a partir de la austenita, cuando esta se enfría en condiciones definidas. Es la capacidad del acero para lograr profundidad de temple. La templabilidad se evalúa a través de la dureza.

Los elementos de aleación aumentan la templabilidad y bajan la velocidad crítica.

ENSAYO JOMINY: método para evaluar la templabilidad. Consiste en templar con un chorro de agua, el cual impactará desde un extremo a una probeta cilíndrica de dimensiones estandarizadas que ha sido previamente austenizada. Permite reproducir en una sola probeta diferentes y sucesivas velocidades de enfriamiento.

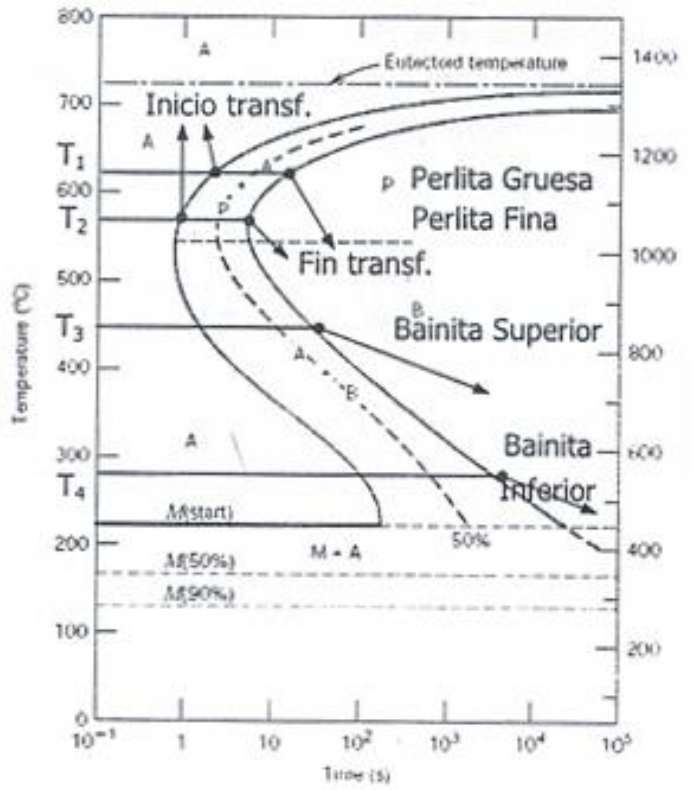
La curva de Jominy es una propiedad del acero, es decir, que depende de su composición química y tamaño de grano. Un acero tendrá más templabilidad, cuanto más lejos del extremo aparece la caída de dureza en la curva Jominy.

Etapas del ensayo Jominy:

1) CALENTAMIENTO
    - Colocar la probeta normalizada protegida dentro del horno.
    - 60°C más elevado que la temperatura crítica superior durante 30 minutos.
2) ENFRIAMIENTO
    - 15 minutos mínimo en el dispositivo.
    - Caudal constante.
    - Altura libre del chorro de agua 65±10mm.
3) EVALUACIÓN
    - Rectificar generatrices a 0,4mm de profundidad.
    - Tomar durezas hasta cubrir aproximadamente 50 mm (2 primeras cada 1,5mm, las 6 siguientes a 2mm y las restantes a 5mm)
    - Representar en un sistema de ejes los valores de dureza (y) vs. Distancia (x). Se toman durezas Rockwell “C”.

BANDAS DE TEMPLABILIDAD: los aceros normalizados responden a una composición química, con cierta variación máxima y mínima en cada uno de los elementos que están presentes. La templabilidad es una característica del acero y depende de la composición química y del tamaño de grano del mismo, por tal motivo, se puede presentar una curva de máxima templabilidad y otra de mínima templabilidad.

CURVAS TTT: establecen las transformaciones metalográficas en función del tiempo. Tiempo-Temperatura-Transfromación.



b. AUSTEMPERING: tratamiento de endurecimiento por el cual obtenemos una microestructura bainítica a partir de la transformación isotérmica de la austenita. Se emplea en aceros hipoeutectoides y se aplica en piezas de pequeña sección y geometría complicada y piezas que deben tener una tenacidad muy alta (arandeles, chapas finas, barras estabilizadoras).

Etapas:

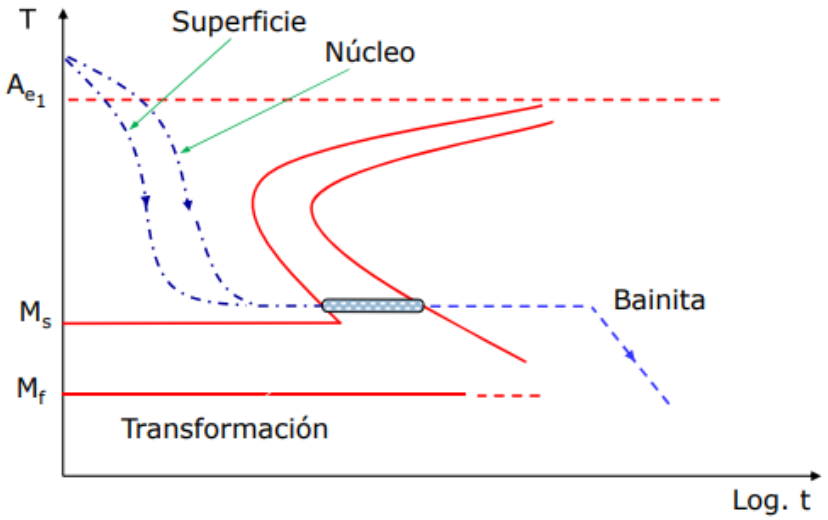
1) Calentar el acero hasta llevarlo al estado de austenización completa.
2) Enfriamiento en baño de sales fundidas a una temperatura que oscila entre los 250 y 400°C, seguido por un mantenimiento a una temperatura constante hasta la total trasformación de la austenita en bainita.
3) Retiro la pieza del baño de sales con posterior enfriamiento al aire.

Ventajas:

- Disminuye los riesgos de fisuras y distorsión respecto del temple y del martempering.
- No hay necesidad de realizar un revenido posterior, ya que la bainita tiene buena tenacidad

Limitaciones:

- No se puede aplicar a cualquier acero. Existen limitaciones por templabilidad.
- El tiempo necesario para que se complete la transformación a bainita no debe ser muy grande.
- No se puede alcanzar altas durezas.
- El espesor de la pieza no puede superar los 25 a 30 mm.



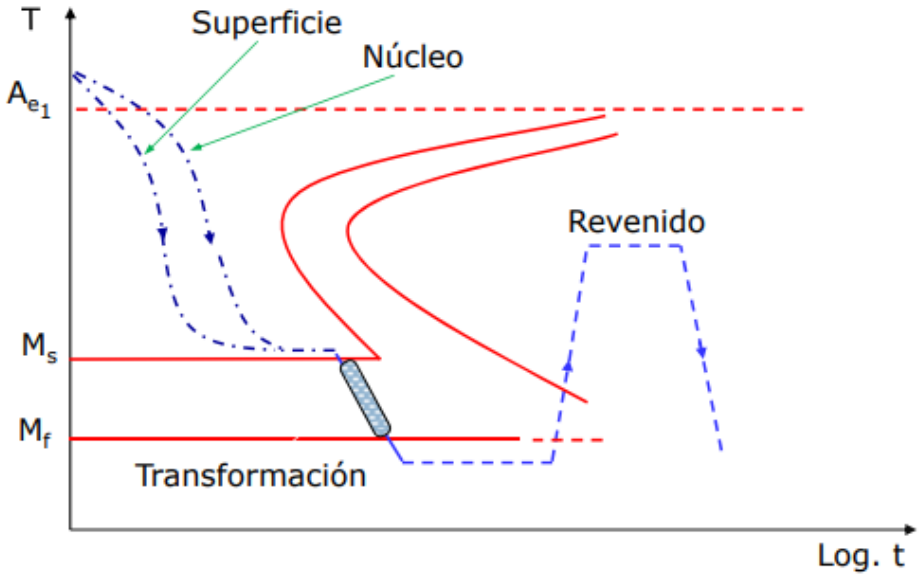
c. MARTEMPERING: es un temple en 2 etapas. Alcanzada la temperatura de austenización, se aplica una primera etapa de enfriamiento hasta una temperatura superior a Ms en un baño de sales fundidas, se lo mantiene un corto lapso para homogeneizar las temperaturas de la superficie y del núcleo de la pieza. Una vez alcanzada la homogeneidad térmica, enfriamos al aire y obtenemos una estructura martensita con mucho menos tensiones y menos exposición a la deformación. Se aplica a una gran variedad de piezas con geometría relativamente complicada y de espesores no muy grandes (engranajes, ejes, eslabones de cadenas)
Al igual que el temple, se requiere de un revenido posterior.

Ventajas:

- Disminuye los riesgos de fisuras y distorsión por temple.
- Se reduce al máximo las tensiones internas.

Limitaciones:

- No se puede aplicar a cualquier acero, se necesita una cierta templabilidad mínima ya que el enfriamiento inicial no es muy intenso.
- El diámetro máximo admisible de la pieza es de 10 a 12 mm para aceros al carbono y 20 a 30 mm para aceros aleados.



3. TRATAMIENTOS TERMOQUÍMICOS DE ENDURECIMIENTO: el objetivo es aumentar el nivel de dureza, resistencia al desgaste, resistencia a la fatiga y resistencia a la corrosión de la capa superior de la pieza. El núcleo de la pieza tendrá un menor nivel de dureza, menor nivel de resistencia que la superficie, pero tendrá mayor tenacidad.
    a. Cementación: consiste en aumentar superficialmente el contenido de carbono y como consecuencia aumentar la dureza, calentando el acero previamente hasta el rango austenítico. Para lograr el endurecimiento de la capa, es necesario un temple posterior. La dureza de la capa se basa en la obtención de una martensita de alto carbono con la menor fracción de austenita retenida posible y ausencia de cementita.

        Medios: sólido, líquido o gaseoso.

        Temperaturas: 850 a 950°C
    b. Nitruración: consiste en introducir nitrógeno a un acero con el objeto de formar una capa rica de nitruros. De esta manera, quedará una pieza con dureza en el exterior y resistencia y tenacidad en el interior.

        Una ventaja con respecto a la cementación, es que al ser un tratamiento de menor temperatura y que no requiere un tratamiento térmico posterior, prácticamente no genera distorsión.

        Medios: gaseoso.

        Temperaturas: 500 a 590°C.
    c. Carbonitruración: consiste en introducir carbono y nitrógeno en la superficie de la pieza, mediante la acción de una mezcla de gases o en un baño de sales fundidas. Necesita de un temple y revenido posterior.

        Si bien pueden precipitar algunos nitruros, el endurecimiento de la capa es principalmente martensítico.

        El núcleo de la pieza adquiere resistencia y tenacidad mediante el tratamiento de temple y revenido que se le da a la pieza.

        Medios: líquido y gaseoso.

        Temperaturas: 790 a 870°C.

FUNDICIONES

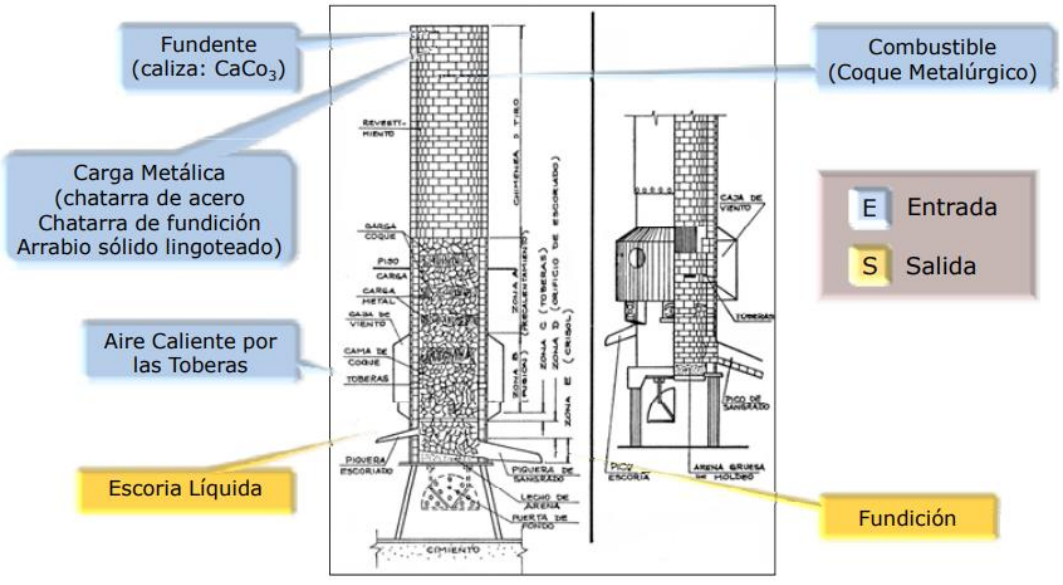
Las fundiciones son aleaciones ternarias de Fe-C-Si. Después del C el elemento de aleación más importante es el Si (silicio) y le siguen el Mn (manganeso), P (fósforo) y S (azufre) en orden de importancia. Se trabaja con diagramas Fe-C con contenido fijo de Si.

Las fundiciones son notablemente más débiles que los aceros, ya que no son capaces de disolver todo el C que poseen por lo tanto en las fundiciones comunes el C precipita como láminas que presentan Solución de Continuidad a la Fractura.

Características:

- La calidad es menor a la de los aceros.
- Bajo costo.
- Menor contracción.
- Resistencia a la compresión.
- Poseen características lubricantes.
- Adquieren su forma definitiva directamente por colada (se fabrican en cubilote).

HORNO CUBILOTE: es un reactor químico cilíndrico que trabaja a contracorriente, con intercambio químico y térmico entre gases ascendentes y cargas descendentes. La carga se efectúa por la parte superior y consiste en capas alteradas de fundente (caliza), carga metálica (chatarra de acero, chatarra de fundición, arrabio sólido lingoteado) y combustible (coque metalúrgico).



CLASIFICACIÓN DE LAS FUNDICIONES

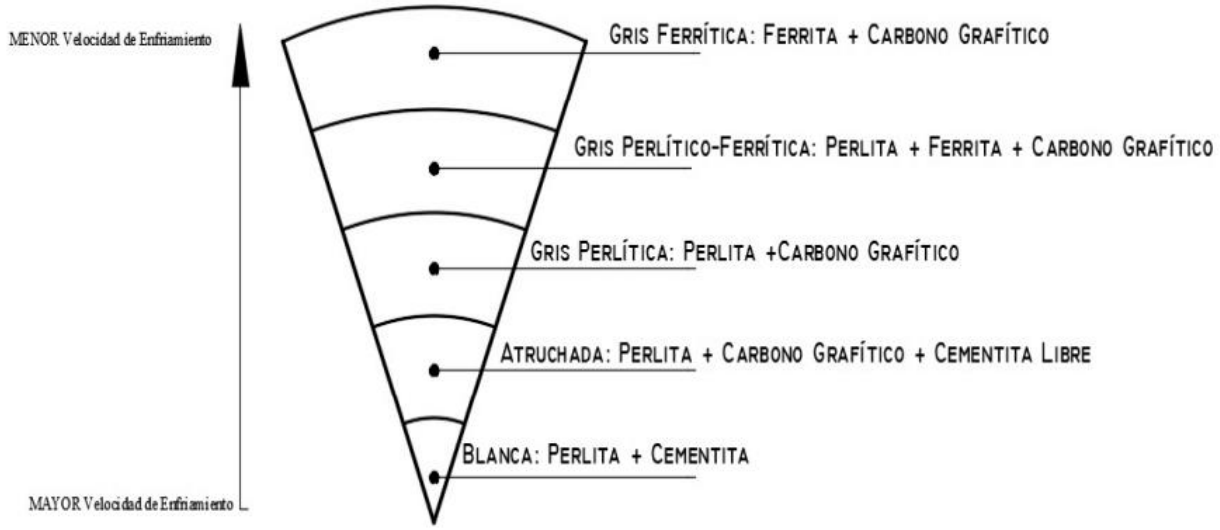
1) Por el color a la fractura:
    a. Blanca (todo el carbono se encuentra formando cementita con un porcentaje de silicio de menos del 1%)..
    b. Atruchada (parte del carbono forma cementita y otra parte grafito con un porcentaje de silicio de 0,6 a 1,5%)
    c. Gris (el carbono libre forma grafito en láminas con un porcentaje de silicio de 1,5 a 3,5%).

2) Por el concepto de carbono equivalente:

$$C_{EQ} = C_T + \frac{Si}{3}$$

- Fundiciones Hipoeutécticas (*C>2,11% a 4,3%*)
- Fundiciones Eutécticas (*C≅4,3%*)
- Fundiciones Hipereutécticas (*C>4,3% a 6,7%*)

VELOCIDAD DE ENFRIAMIENTO: depende de las piezas y de la clase de molde empleado. Los enfriamientos rápidos tienden a producir fundiciones blancas, y los enfriamientos lentos favorecen a la formación de grafito, formando fundiciones grises.


MENOR Velocidad de Enfriamiento
MAYOR Velocidad de Enfriamiento
GRIS FERRÍTICA: FERRITA + CARBONO GRAFÍTICO
GRIS PERLÍTICO-FERRÍTICA: PERLITA + FERRITA + CARBONO GRAFÍTICO
GRIS PERLÍTICA: PERLITA +CARBONO GRAFÍTICO
ATRUCHADA: PERLITA + CARBONO GRAFÍTICO + CEMENTITA LIBRE
BLANCA: PERLITA + CEMENTITA

GRAFITO:

- Forma elemental del carbono.
- Blando, de color gris oscuro.
- Su froma, tamaño, cantidad y distribución influyen en las propiedades y características de la fundición.
- En fundiciones grises se presenta en forma de láminas, en maleables con forma de rosetas y en nodulares en forma de nódulos.

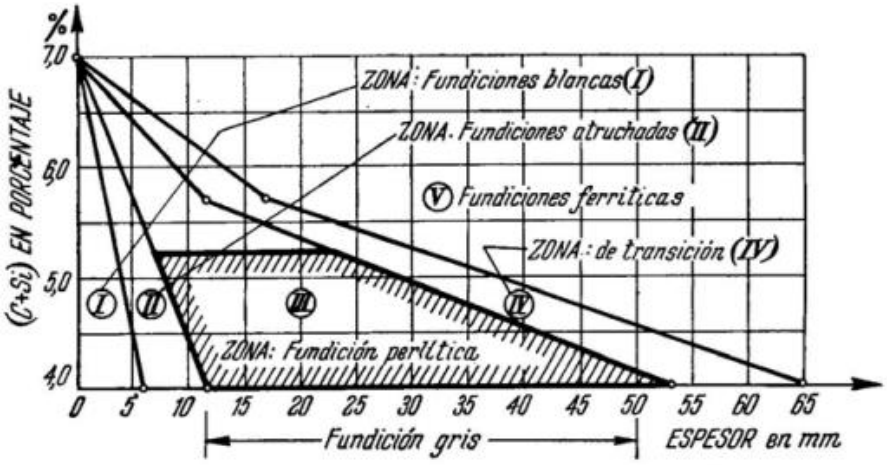
GRAFITIZANTES: elementos que favorecen la precipitación de C en forma de grafito, Carbono y Silicio.

ANTIGRAFITIZANTES: elementos que impiden la precipitación de grafito, Manganeso y Azufre.

La grafitización está influenciada por dos factores: Temperatura y Tiempo

Fe3C → C (g) + Fe (α)

DIAGRAMA DE GREINER Y KLINGENSTEIN: es un diagrama puramente empírico, sirve para fundiciones comunes y da una orientación estructural bastante aproximada de la estructura a obtener en función de la composición química y el espesor de la pieza.



CLASIFICACIÓN DE LAS FUNDICIONES POR EL COLOR DE SU FRACTURA

TIPO		MATRIZ	FORMA DEL C
Blanca		Perlita	Fe_3C
Atruchada		Perlita	Fe_3C + C (g)
Gris	Perlítica	Perlita	C (g)
	Ferrítico-Perlítica	Perlita + Ferrita	C (g)
	Ferrítica	Ferrita	C (g)

Dentro de las fundiciones comunes se tiende a fabricar la gris perlítica pues da la mejor combinación de propiedades mecánicas. La fundición blanca solo sirve para fabricar mediante tratamiento térmico Hierro maleable y su fragilidad hace inservible para cualquier otro uso.

VENTAJAS DE LAS FUNDICIONES CON RESPECTO AL ACERO:

- Piezas más económicas
- Fabricación más sencilla con instalaciones menos costosas y temperaturas de fusión más bajas.
- Más fáciles de mecanizar ya que el grafito actúa como lubricante.
- Facilidad de fabricación en distintos tamaños y formas.
- Medidas dimensionales más precisas y menor porosidad.
- Su fabricación exige menor cantidad de precauciones y de conocimientos técnicos especiales.
- Las temperaturas de fusión son más bajas, logrando gran fluidez y facilitando piezas de poco espesor.
- Menor contracción durante la solidificación.
- Correctas características mecánicas: resistencia a la compresión, resistencia a la tracción y buena resistencia al desgaste.

INFLUENCIA DE LOS ELEMENTOS:

- Silicio: en grandes cantidades contribuye a la formación de grafito.
- Azufre: es antigrafitizante y tiene una fuerte afinidad con el manganeso y al combinarse con este forman sulfuro de manganeso que no influye en la formación de grafito o cementita. Y cuando existe exceso de azufre, forma con el hierro sulfuro de hierro que favorece la formación de cementita y por lo tanto blanquea la fundición.
- Fósforo: favorece la colabilidad y provoca fragilidad y dureza.
- Manganeso: es antigrafitizante, aumenta la dureza de la fundición dificultando su mecanización. Su principal papel es neutralizar al azufre para impedir la formación de sulfuro de hierro.

COLABILIDAD: capacidad de la aleación para llenar completamente moldes de formas complicadas. El Fósforo forma con el Hierro un eutéctico Fosfuro de Hierro llamado Steadita que aumenta la colabilidad. El inconveniente es que aumenta la fragilidad.

STEADITA: eutéctico binario de ferrite que contiene 10,2% de fósforo y 89,8% de hierro. Compuesto duro, frágil y de bajo punto de fusión (1050°C). Aparece en fundiciones de alto contenido de fósforo.

FUNDICIONES ESPECIALES

1. Hierros hipoeutécticos sub-efriados: la solidificación se produce de tal manera y a tal velocidad que no precipita grafito, lo cual provoca la aparición de carburos libres en la estructura que les da una fragilidad elevada. Para evitar este efecto indeseable, se prefiere grafitizar generando artificialmente núcleos de precipitación en estado líquido, de manera controlada, y de esta forma se hace precipitar el C como grafito. Los agentes que provocan esta precipitación controlada se denominan Inoculantes.
   Un inoculante muy común es el ferro-silicio y otro el siliciuro de Calcio. El inconveniente de los citados es que no son selectivos, por lo que atacan todos los carburos, lo que provoca una fuerte caída de la resistencia mecánica. Además, estos inoculantes actúan sin distinción del espesor, generando un crecimiento desmedido y perjudicial del grafito. Para solucionar este inconveniente se recurre a los llamados Agentes Inoculantes Balanceados, que a diferencia de los anteriores no solo contienen agentes grafitizantes sino también antigrafitizantes. Esto los hace de Acción Selectiva y de mayor rendimiento. Ej.: el Si (grafitizante), Mn, Zr (antigrafitizante).
2. Hierro maleable: aquellos obtenidos a partir del tratamiento térmico de la fundición blanca. Da piezas pequeñas de formas variadas de un material tenaz y resistente, útil para muchas piezas de máquinas e instalaciones. El C precipita en forma de rosetas lo que da una estructura de propiedades muy superiores a la fundición común (precipitación laminar). Hay dos tipos:
   - Europea ó de Corazón Blanco: las piezas son envueltas con un agente oxidante y dentro de cajas cerradas son sometidas a un recocido entre 900 a 1100°C durante 3 a 6 días. Luego, la fundición blanca se decarbura al realizar una difusión de carbono del interior al exterior bajo la acción del agente oxidante, quedando así un nuevo

material con mayor tenacidad. En general, en el exterior de la pieza la estructura es Ferrita + C (g) y en el interior es Ferrita + Perlita + C (g). El grado de decarburación de la Fundición Europea depende del espesor de la pieza.

- Americana ó de Corazón Negro: las piezas se envuelven dentro de cajas cerradas rodeadas de arena, el proceso de recocido es más corto y hay que tener mayor cuidado con el proceso de enfriamiento. La fundición blanca no se decarbura y el carbono no emigra de la fundición, si no que precipita durante el recocido bajo la forma de rosetas de grafito volviéndose muy tenaz.

CARACTERÍSTICAS DEL TRATAMIENTO TÉRMICO

	EUROPEO	**AMERICANO**
Medio de Empaque	Mineral de Fe	Arena
Temp. de Recocido	950 a 1000 °C	900 °C
Duración	60 a 96 hs.	50 hs.
Enfriamiento	Hasta 600 °C 5 hs.	675 °C 3 hs.
Estructura	Perlita + Carbono recocido en la Ferrita	Carbono recocido en matriz de Ferrita

Comparando ambos procesos se puede decir en forma general, que la Maleable Americana ó Negra, exige una técnica más precisa en cuanto a la composición química y al proceso de recocido que la Maleable Europea ó Blanca. Por otra parte, con la Maleable Americana se consiguen resistencias y, sobre todo, alargamientos algo más elevados que con la Europea. Otra ventaja de la Maleable de Corazón Negro, es que con ella se consiguen resultados bastante satisfactorios con espesores mayores comparado con la Maleable Europea.

ETAPAS DE FABRICACIÓN DE FUNDICIÓN MALEABLE

1º. Disociación de la Perlita
$Perlita \rightarrow s.s\ Fe\ \alpha + Fe_3C$
2º. Disolución de $Fe_3C\ en\ s.s\ \gamma$
3º. Disociación de Fe_3C (cementita)
4º. Difusión del C
5º. Precipitación del C

REACCIONES EN EL PROCESO FUNDICIÓN MALEABLE BLANCA - DECARBURACIÓN

$$Fe_3C + Fe_2O_3 \Leftrightarrow 3\ Fe + 2\ FeO + CO$$

$$Fe_3C + CO_2 \Leftrightarrow 3\ Fe + 2\ CO$$

$$2\ Fe_3C + O_2 \Leftrightarrow 6\ Fe + 2\ CO$$

$$2\ CO + O_2 \Leftrightarrow 2\ CO_2$$

REACCIONES DE REDUCCIÓN

$$Fe_3C + 2\,H_2 \Leftrightarrow 3\,Fe + CH_4$$

$$Fe_3C + H_2O \Leftrightarrow 3\,Fe + H_2 + CO$$

3. Fundiciones nodulares: propiedades físicas superiores a la Fundición Maleable. Se obtienen a partir del líquido por agregado de inoculantes, con los cuales se consigue que el C precipite como nódulos y no como láminas. Son las fundiciones de mayor contenido de C.
   Es fundamental que el S sea menor a 0.02 %, pues todo nodulizante actúa primero como desulfurante y luego el remanente actúa en el Fe (líq.).
   Los inoculantes más efectivos son el Mg (magnesio) y el Ce (cerio).
   El inoculante se agrega en cuchara bajo la forma de aleaciones debido a su alta reactividad y de no hacerlo así, las altas temperaturas harían que reaccione químicamente antes de actuar como nodulizante. La inoculación debe efectuarse siempre a temperaturas superiores a 1450 °C pues por debajo de esta temperatura se corre el riesgo que se formen láminas de grafito.
   Los métodos de nodulización más comunes son:

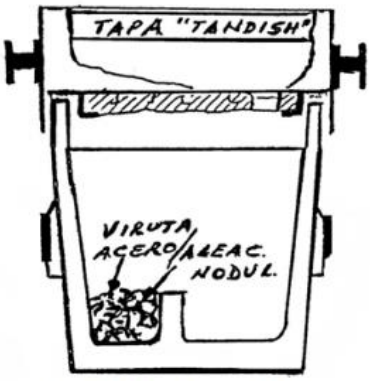


Fig. 4: Método Sándwich

➢ Método Sándwich: se utiliza una cuchara en cuyo fondo en un recinto especial se ubica el nodulizante, que se aplica cubierto con virutas de acero para evitar la reacción inmediata con el chorro líquido de fundición.

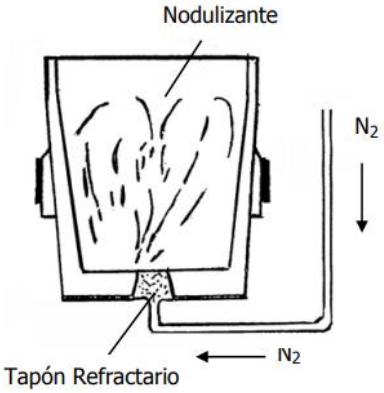


Fig. 5: Método Tapón Poroso

➢ Método de Cuchara con tapón Poroso: se ubica en el piso de la cuchara un tapón cónico especial, poroso, permeable a los gases e impermeable al Hierro líquido. Se insufla a través del mismo un gas inerte, generando un burbujeo que produce corrientes que homogenizan la distribución del inoculante.

POLÍMEROS

Son sustancias orgánicas de alto peso molecular producidas a partir del petróleo y gas natural o de carbón y cloruro de sodio.

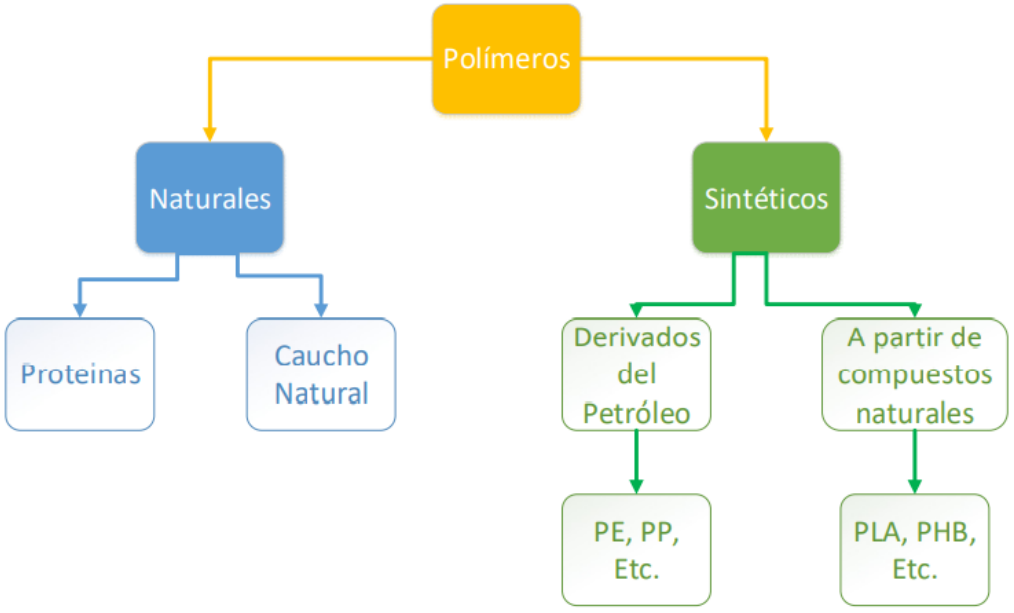
Los plásticos: polímeros + aditivos. Son materiales ya listos para la fabricación de piezas.

¿POR QUÉ PRESENTAN TANTAS APLICACIONES?

- Bajo peso
- Posibilidad de obtener variedad de colores y texturas.
- Aislamiento eléctrico y acústico.
- Buenas propiedades mecánicas.
- Bajo precio.
- Alta resistencia a la corrosión.
- Son versátiles, se pueden hacer piezas complejas sin trabajos de terminación.
- Menor consumo energético por menos temperaturas de procesamiento.
- Automatización y alta producción.

CRISTALINIDAD: es importante en los polímeros ya que afecta a sus propiedades mecánicas y ópticas. La cristalinidad se presenta durante el procesamiento de los polímeros como resultado de los cambios en la temperatura y los esfuerzos aplicados. Si las regiones cristalinas se hacen demasiado grandes, empiezan a dispersar más luz y se hacen translúcidos. Al aumentar la cristalinidad del polímero también se incrementa su densidad, la resistencia al ataque químico y sus propiedades mecánicas

1. CLASIFICACIÓN SEGÚN SU ORIGEN:

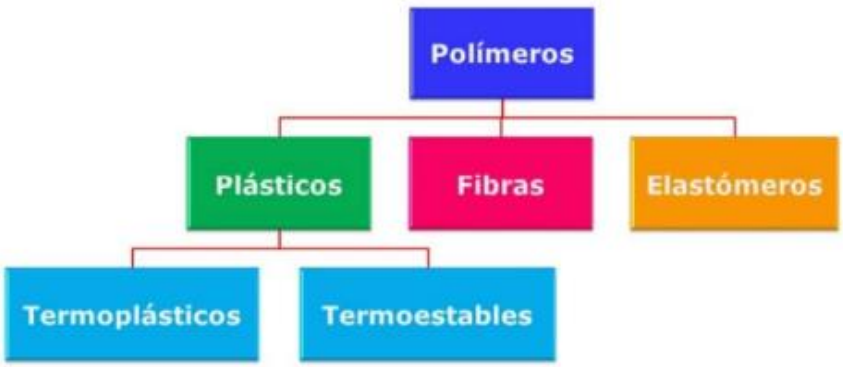


2. CLASIFICACIÓN SEGÚN SU ESTRUCTURA DE CADENA:
    - Lineales: las unidades monoméricas se unen unas a otras formando enlaces simples. Ejemplo: termoplásticos, polietileno (PE), cloruro de polivinilo (PVC)
    - Ramificados: la cadena principal está conectada lateralmente con otras cadenas secundarias. Ejemplo: termoplásticos.
    - Entrecruzados: cadenas lineales adyacentes se unen transversalmente en varias posiciones mediante enlaces covalentes. Ejemplo: termorrigidos, elastómeros.

3. CLASIFIACIÓN SEGÚN SU ESTRUCTURA MOLECULAR:
    - Amorfos: PVC, poliestireno (PS)
    - Semicristalinos: polietileno (PE), polipropileno (PP), polietilentereftalato (PET)
    - Elastómeros: EPDM, NBR/Termorrigidos: Epoxies, resinas melaminicas.

4. CLASIFICACIÓN SEGÚN EL TIPO DE MÓNOMERO:
    - Homopolímero: polímero constituido por la repetición de un único tipo de monómero (cadena homogénea). Ejemplos: polietileno (PE), poliestireno (PS).
    - Copolímero: polímero constituido por dos o más tipos de monómeros (cadena heterogénea). Ejemplos: SAN, NBR, SBR.

5. CLASIFICACIÓN SEGÚN SU COMPORTAMEINTO TERMO-MECÁNICO:



- PLÁSTICOS: son polímeros que durante alguna etapa de la fabricación son llevados al estado líquido para moldearse por calor o presión en un molde. Una vez que las piezas hayan solidificado, el material es químicamente muy estable bajo condiciones ambientales normales. Algunos son duros y frágiles, otros son flexibles y presentan tanto elasticidad como plasticidad al estar sometidos a un determinado esfuerzo. El efecto de la temperatura sobre los polímeros permite realizar la siguiente subclasificación:
    - TERMOPLÁSTICOS: Necesitan calor para darles su forma y después enfriarlos, de este modo adquieren y conservan la forma que se les dio. Estos materiales pueden volverse a calentar un cierto número de veces para darles nuevas formas sin que haya un cambio significativo en sus propiedades. En general, se comportan de manera plástica y dúctil. En este tipo de materiales, las largas cadenas moleculares están

ligadas entre sí por enlaces secundarios o de Van der Waals y debido a ello pueden ser reciclados. Ejemplos de éstos son: el polietileno (PE), poliporopileno (PP), poliestireno (PS), nylon.

- TERMORÍGIDOS: adquieren una forma permanente y fijados por una reacción química, no se pueden volver a fundir y darles forma nuevamente, ya que se degradan o descomponen cuando se calientan a una temperatura muy elevada. En otras palabras, los plásticos termorrigidos no son reciclables. Ejemplos: resinas.

  Estos polímeros poseen buena resistencia, rigidez y dureza. Sin embargo, tienen malas propiedades de ductilidad e impacto.

  Las ventajas de los termorrigidos para las aplicaciones ingenieriles son:

  - ✓ Alta estabilidad térmica
  - ✓ Alta rigidez
  - ✓ Buena resistencia a la fluencia y a la deformación bajo carga
  - ✓ Bajo peso
  - ✓ Buenas propiedades como aislante térmico y eléctrico

- FIBRAS: son materiales que tienen una relación longitud/diámetro muy grande. Ejemplos: poliésteres, poliamidas.
- ELASTÓMEROS (cauchos): son materiales poliméricos de origen natural o sintético. Los cauchos se caracterizan por su capacidad de recuperar la forma original rápidamente después de sufrir una deformación bajo la acción de una fuerza. Su uso es indispensable en el ámbito industrial, aplicaciones prácticas como neumáticos, acústicos, acoples elásticos, correas de transmisión. Dada sus características de impermeabilidad al agua, también son empleados como recipientes autosellantes y aislante eléctrico.

POLIMERIZACIÓN: proceso mediante el cual se unen las moléculas más pequeñas para formar una molécula de gran tamaño.

- POR ADICIÓN: para que inicie el proceso de polimerización por adición, se agrega una molécula altamente reactiva al monómero, llamada iniciador, que posee una gran capacidad de formar uniones químicas. Dicho iniciador atrae uno de los átomos de carbono de un monómero y al ocurrir esta reacción, el sitio reactivo se transfiere a otro átomo de carbono del monómero y empieza a formarse una cadena, generándose una molécula de mayor tamaño. (PE, PP, PS, PVC)
- POR CONDENSACIÓN: la polimerización por condensación es la formación de polímeros por medio de reacciones químicas intermoleculares que normalmente implican más de una especie monomérica y generalmente se origina un producto de bajo peso molecular, como puede ser el agua, que luego se elimina. (PET)

GRADO DE POLMERIZACIÓN: Los polímeros no tienen un peso molecular fijo. La longitud promedio de un polímero lineal está representada por el grado de polimerización, es decir, el número de unidades de repetición existentes en la cadena.

$$\text{Grado de polimerizacion} = \frac{peso\ molecular\ promedio\ del\ polímero}{\text{peso molecular de la unidad de repetición}}$$

Si el polímero sólo contiene un tipo de polímero, el peso molecular de la unidad de repetición es la del monómero. Si el polímero contiene dos o más tipos de monómeros, el peso molecular de la unidad de repetición será la suma de los pesos moleculares de los monómeros, menos el peso molecular del subproducto.

SIMETRÍA: es la regularidad con la que se disponen las formaciones laterales a cada lado de la cadena principal.

- Sindiotáctica: los grupos atómicos se disponen en posiciones regularmente alternadas a cada uno de los lados de la cadena principal.
- Isotáctica: todos los grupos atómicos se disponen en posiciones del mismo lado de la cadena principal.
- Atáctica: los grupos atómicos se disponen en posiciones al azar a uno y otor lado de la cadena principal.

VULCANIZACION: es un proceso químico por el cual las moléculas del polímero se unen unas con otras con enlaces cruzados para dar forma a moléculas más voluminosas que restringen el movimiento molecular. Se realiza calentando en un rango que oscila entre los 100 y 200 °C, una mezcla de caucho natural con azufre con una proporción del 0.15 %, logrando que el caucho pase de ser un material termoplástico a uno elastomérico. Este proceso aumenta la resistencia a la tracción del caucho natural.

El caucho y el azufre reaccionan muy lentamente, de modo que para acortar su tiempo de curado se adicionan al caucho aceleradores químicos, además de otros aditivos como pueden ser:

- Catalizadores: aceleran las reacciones.
- Activadores: inician la reacción del catalizador.
- Antioxidantes: se utilizan para mejorar el desempeño a los rayos UV y al ozono.
- Plastificantes: se utilizan para mejorar el moldeado de la mezcla y propiedades adhesivas entre capas de caucho.
- Cargas de refuerzo: aumentan la resistencia a la abrasión o al desgaste.

ADHESIVOS: son polímeros que se utilizan para unir otros polímeros, metales, materiales cerámicos, materiales compuestos o combinación de los anteriores. La propiedad más importante de los mismos es la adherencia, que es la formación de enlaces iónicos o covalentes entre adhesivo y producto. El adhesivo debe tener buena resistencia mecánica, debe ser capaz de resistir el impacto, la deformación y la torsión. Podemos encontrar:

- ADHESIVOS QUIMICAMENTE REACTIVOS: los sistemas de un solo componente están constituidos por una resina polimérica, que se cura por exposición a la humedad, al calor o en el caso de los anaeróbicos, por ausencia de oxígeno. Los sistemas de dos componentes, como los epóxicos, se curan al combinarse dos resinas.
- ADHESIVOS POR EVAPORACIÓN O DIFUSIÓN: el adhesivo se disuelve en un solvente orgánico o en agua y se aplica a las superficies que deben unirse. Al evaporarse el portador, el polímero restante forma la unión.

- ADHESIVOS DE FUSIÓN POR CALOR: estos termoplásticos y elastómeros termoplásticos se funden si se calientan. Al enfriarse, el polímero se solidifica uniendo los materiales. Las temperaturas de fusión de estos adhesivos son de aproximadamente 80 °C a 110 °C.
- ADHESIVOS SENSIBLES A LA PRESIÓN: estos adhesivos son principalmente elastómeros o copolímeros de elastómero y se requiere de presión para que el polímero se adhiera al sustrato.
- ADHESIVOS CONDUCTORES: un adhesivo polimérico puede contener un material de relleno; como ser escamas o polvo de plata, cobre o aluminio para obtener conductividad eléctrica y térmica.

ADITIVOS PARA LOS POLIMEROS: la mayoría de los polímeros contienen aditivos para mejorar el rendimiento mecánico, óptico, eléctrico, acústico, entre otros. Los mismos pueden clasificarse en:

- PIGMENTOS: se los emplea para colorear plásticos y pinturas.
- ESTABILIZADORES: impiden el deterioro del polímero provocado por el medio ambiente. Existen estabilizadores térmicos, antioxidantes, y absorbedores de luz ultravioleta. Los antioxidantes se añaden al PE y al PS. Los estabilizadores al calor se requieren para el procesamiento del PVC. Los estabilizadores evitan también el deterioro ocasionado por la radiación ultravioleta.
- AGENTES ANTIESTÁTICOS: la mayoría de los polímeros al ser malos conductores de la electricidad, generan carga estática. Los agentes antiestáticos atraen mayor humedad del aire hacia la superficie del polímero mejorando la conductividad superficial del mismo y reduciendo así la posibilidad de generar una chispa o descarga eléctrica.
- RETARDANTES DE LA COMBUSTIÓN O LLAMA: la mayoría de los polímeros por ser materiales orgánicos son inflamables. Los aditivos que contienen cloruros, bromuros, fosfuros reducen la posibilidad de que ocurra o se extienda la combustión.
- LUBRICANTES: facilitan a la fluidez del fundido durante el procesado evitando el pegado sobre superficies metálicas.
- PLASTIFICANTES: Son moléculas de bajo peso molecular que, reduciendo la temperatura de transición vítrea, mejoran las propiedades y características de conformabilidad del polímero. Los plastificantes son particularmente importantes para el PVC, que tiene una temperatura de transición vítrea, Tg, superior a la temperatura ambiente.
- REFUERZOS: algunos rellenos como el negro de humo que se adiciona al caucho mejoran la resistencia a la carga y al desgaste en los neumáticos. Algunos rellenos como las fibras cortas o las hojuelas de materiales inorgánicos mejoran las propiedades mecánicas.
- AGENTES ESPUMANTES: algunos polímeros incluyendo el PS, pueden ser expandidos en forma de espuma con huecos celulares, las cuales son excelentes materiales aislantes con una densidad excepcionalmente baja.

TRANSICIÓN VITREA: se define como la temperatura a la cual el polímero o elastómero adquiere propiedades características de estado vítreo como la fragilidad, densidad, rigidez. Esta temperatura -medida en °C- depende de la estructura química del polímero y, por lo tanto, puede usarse para identificar el polímero o elastómero. Es la temperatura en la cual un polímero cambia de un estado

rígido y quebradizo a otro blando y maleable. Está presente sólo en los polímeros amorfos y es diferente para cada uno de ellos.

La transición vítrea es una propiedad típica de la porción amorfa de un sólido semicristalino. Los polímeros amorfos solo exhiben una Tg, los polímeros cristalinos exhiben una Tf (temperatura de fusión) y típicamente una Tg ya que generalmente también hay una porción amorfa (semicristalina).

PET (polietilentereftalato)

- Se produce a partir del ácido tereftálico y etilenglicol, por poli condensación; existiendo dos tipos: grado textil y grado botella.
- Se usa para envases de gaseosas, agua mineral, aceites, cosmética, bolsas para horno, bandejas para microondas.

PEAD (polietileno de alta densidad)

- Se fabrica a partir del etileno. Es muy versátil y se lo puede transformar de diversas formas: inyección, soplado, extrusión, o rotomoldeo.
- Se usa para envases de detergentes, lavandina, aceite automotor, shampoo, lácteos, gaseosas, cervezas, baldes para pintura, tambores, caños para gas, agua potable.

PVC (policloruro de vinilo)

- Se produce a partir de dos materias primas naturales: gas 43% y sal común 57%.
- Se usa para marcos de ventanas, puertas, caños para desagües, mangueras, juguetes, envolturas para golosinas, film, cables, papel vinílico, catéteres, bolsas para sangre.

PEBD (polietileno de baja densidad)

- Se produce a partir del gas natural. Es de gran versatilidad y se procesa de diversas formas: inyección, soplado, extrusión, o rotomoldeo.
- Su transparencia, flexibilidad, tenacidad y economía hacen que esté presente en una diversidad de envases.
- Se usa para bolsas de todo tipo: supermercados, boutiques, congelados, industriales, etc.

PP (polipropileno)

- Se obtiene por polimerización del propileno. Es un plástico rígido de alta cristalinidad y elevado punto de fusión, excelente resistencia química y de más baja densidad. Al adicionarle distintas cargas (talco, fibra de vidrio), se potencias sus propiedades hasta transformarlo en un polímero de ingeniería. Es transformado en la industria por los procesos de inyección, soplado y extrusión.
- Se usa para bolsas tejidas (papas, cereales), envases industriales, hilos, caños para agua caliente, jeringas descartables, tapas en general, envases, cajones para bebidas, alfombras, paragolpes y autopartes.

PS (poliestireno)

- PS CRISTAL: es un polímero de estireno monómero, cristalino y de alto brillo.
- PS ALTO IMPACTO: es un polímero de estireno monómero con oclusiones de polibutadieno que le confiere alta resistencia al impacto.
- Ambos son fácilmente moldeables a través de procesos de: inyección, extrusión/termoformado, soplado.
- Se usa para potes para lácteos (yogurt, postres), envases varios, vasos, bandejas de supermercado y rotiserías, platos, cubiertos.

PROPIEDADES DE LOS PLÁSTICOS:

- Su arquitectura es molecular.
- Propiedades ópticas: los polímeros amorfos son transparentes, mientras que los cristalinos son opacos.
- Propiedades térmicas: temperaturas de fusión y de solidificación.
- Propiedades físicas: la clasificación por densidad con un sistema de flotación se realiza comparando las densidades del material plástico y sustancias líquidas de densidad conocida.
- Propiedades mecánicas: resistencia al impacto, deformación, tracción, dureza.

ENSAYO DE BEILSTEIN: es un método simple para determinar la presencia de un halógeno (cloro, bromo, yodo). Si la prueba es negativa, es posible que el polímero esté compuesto solamente de carbono, hidrógeno, oxígeno o silicio.

METODOLOGÍA DEL ENSAYO DE BEILSTEIN: un alambre de cobre se limpia y se calienta en la llama de un mechero bunsen para formar una capa de óxido de cobre. Luego se sumerge en la muestra que se va a analizar y se vuelve a calentar en una llama. Una prueba positiva está indicada por una llama verde causada por la formación de un haluro de cobre. (PVC llama verde).